

Интеллектуальная инклинометрическая система со структурной и программной избыточностью для пространственной ориентации

А. И. Заико

Факультет авиационного приборостроения
Уфимский государственный авиационный
технический университет
Уфа, Россия
e-mail: zaiko@ugatu.ac.ru

Г. А. Иванова

Факультет авиационных двигателей
Уфимский государственный авиационный
технический университет
Уфа, Россия
e-mail: ivanova_ga@inbox.ru

Аннотация¹

В работе отражены результаты разработки математической модели инклинометрической системы (ИС), методов и алгоритма с целью практического решения научно-исследовательской задачи подземной навигации и ориентации. Отличительной особенностью ИС является то, что предлагается использовать априорную информацию, структурную и информационную избыточность, заключающуюся в одновременном использовании информации с инерциальных, магнитных и гравитационных измерительных преобразователей в скважинном модуле инклинометра.

1. Введение

Задача подземной навигации и ориентации решается при помощи инклинометрического измерительного комплекса, позволяющего определять пространственную траекторию скважины. Основные задачи, которые решает современная инклинометрия: контроль заданного направления, получение данных для построения профиля скважины, выявление искривлений и перегибов, достижение проектной точки бурения, соблюдение нормативно-правовых требований при разработке месторождений [1].

На сегодняшний день прослеживается тенденция расширения областей практического применения ИС и объемов выполняемых геофизических работ, наблюдается рост числа организаций, осуществляющих работу в направлении развития и производства измерительных инклинометрических систем [2].

Основные работы ведутся в направлении совершенствования приборной базы ИС: улучшения

точностных характеристик первичных датчиков, компенсации инструментальных погрешностей, разработки и тестирования различных схем размещения датчиков в корпусе. При этом основными направлениями дальнейшего развития ИС являются: снижение массогабаритных характеристик и энергопотребления, повышение устойчивости к ситуациям сбоя, оперативность получения информации, снижение затрат и времени на инклинометрию, повышение точности определения пространственного положения оси ствола скважины.

По принципу работы датчика азимута принято различать магнитометрические (МИ) и гироскопические инклинометры (ГИ). В настоящее время наметилась тенденция к комплексному использованию магнитометрических и гироскопических датчиков в одном измерительном модуле с целью повышения надежности ИС и исключения необходимости проведения повторного измерения скважины различными типами ИС. Подобные системы в литературе упоминаются как универсальные ИС или гибридные гироманометрические инклинометры [3-4].

Исследования в области разработки ИС со структурной избыточностью ведутся Ковшовым Г.Н., специалистами НИИ прикладной механики им. акад. В.И. Кузнецова (г. Москва), ЦНИИ «Электроприбор» (г. Санкт – Петербург), ОАО НПФ «Геофизика» и НИИ технических систем «Пилот» (г. Уфа). Следует отметить, что в существующих работах не сформулированы единые рекомендации и критерий выбора достоверного измерения на базе гироскопического или магнитометрического модулей.

2. Функциональная схема ИС со структурной избыточностью

Структурная схема разрабатываемой ИС показана на рис. 1 и представляет собой совокупность скважинного модуля, наземного устройства, связь между которыми осуществляется посредством телеметрии. В состав скважинного модуля входят

¹ Труды второй международной конференции "Интеллектуальные технологии обработки информации и управления", 10 - 12 ноября, Уфа, Россия, 2014

датчики первичной информации, многоканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), контроллер, блоки питания и связи. Наземное устройство состоит из блока связи, блока обработки информации и отображения результатов измерения. Различные варианты реализации ИС со структурной избыточностью представлены в работах [5 -7].

В качестве первичных датчиков ИС используют по три ортогональных акселерометра, феррозонда и гироскопа. Блок акселерометров измеряет проекции ускорения свободного падения g_i на оси, связанные с корпусом скважинного модуля, блок феррозондов – проекции напряженности магнитного поля Земли h_i , блок гироскопов – проекции угловой скорости Земли ω_i .

В результате измерений образуются три пары, позволяющие вычислить пространственные углы скважины: $(\bar{h}, \bar{g})$, $(\bar{\omega}, \bar{g})$, $(\bar{\omega}, \bar{h})$:

$$\alpha_{\omega} = \arctg \left[\frac{(D_1 \cdot A_2 - D_2 \cdot A_1) \cdot \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2}}{A_3 \cdot (D_1 \cdot A_1 + D_2 \cdot A_2) - D_3 \cdot (A_1^2 + A_2^2)} \right],$$

$$\alpha_h = \arctg \left[\frac{(T_1 \cdot A_2 - T_2 \cdot A_1) \cdot \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2}}{A_3 \cdot (T_1 \cdot A_1 + T_2 \cdot A_2) - T_3 \cdot (A_1^2 + A_2^2)} \right] + \beta,$$

$$\theta = \arctg \left[\frac{1}{A_3} \cdot \sqrt{A_1^2 + A_2^2} \right], \quad \varphi = \arctg \left(-\frac{A_2}{A_1} \right), \quad (1)$$

$$v = \arcsin \left[\frac{T_1 \cdot A_1 + T_2 \cdot A_2 + T_3 \cdot A_3}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2} \cdot \sqrt{T_1^2 + T_2^2 + T_3^2}} \right],$$

$$\beta = \alpha_{\omega} - \alpha_h,$$

$$\varphi_{ш} = \arcsin \left[-\left(\frac{A_1 D_1 + A_2 D_2 + A_3 D_3}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2} \cdot \sqrt{D_1^2 + D_2^2 + D_3^2}} \right) \right],$$

где $\alpha_{\omega}, \alpha_h$ – азимут, рассчитанный для комбинаций $(\bar{g}, \bar{\omega})$ и $(\bar{h}, \bar{g})$ соответственно, A_i, D_i, T_i ($i=1,2,3$) – выходные сигналы, поступающие с триады акселерометров, гироскопов и феррозондов, β – угол магнитного склонения, v – угол магнитного наклона, $\varphi_{ш}$ – географическая широта местности.

Введение информационной и структурной избыточности предполагает наличие критерия выбора достоверного измерения. С этой целью был синтезирован алгоритм принятия решения, позволяющий делать вывод о достоверности измерений на базе магнитометрического или гироскопического модулей. В качестве критериев выбора используется априорная информация о наличии магнитных возмущений, сигналы с первичных датчиков и привязка к широте местности.

3. Условия достоверности измерений и алгоритм принятия решения

Регистрировать магнитные аномалии ε_h , вызывающие недопустимые погрешности измерения азимута предложено следующим образом. Известно, что угол магнитного наклона v должен быть одинаковым в устье и в стволе скважины [2, 8]. Таким образом, результат сравнения опорного значения v_0 , замеренного в устье скважины, с рассчитанным v в стволе позволяет судить о наличии или отсутствии магнитных аномалий.

Расчет и анализ допустимых флуктуаций абсолютной погрешности угла магнитного наклона Δv представлен в работах [8]. Значения Δv получены в результате оценки влияния магнитных аномалий на величину абсолютной погрешности азимутального угла. В работе также показано, что значение допустимой флуктуации зависит от географических координат местности, времени года и рассчитывается индивидуально для каждого месторождения [8].

При проведении виртуального эксперимента и

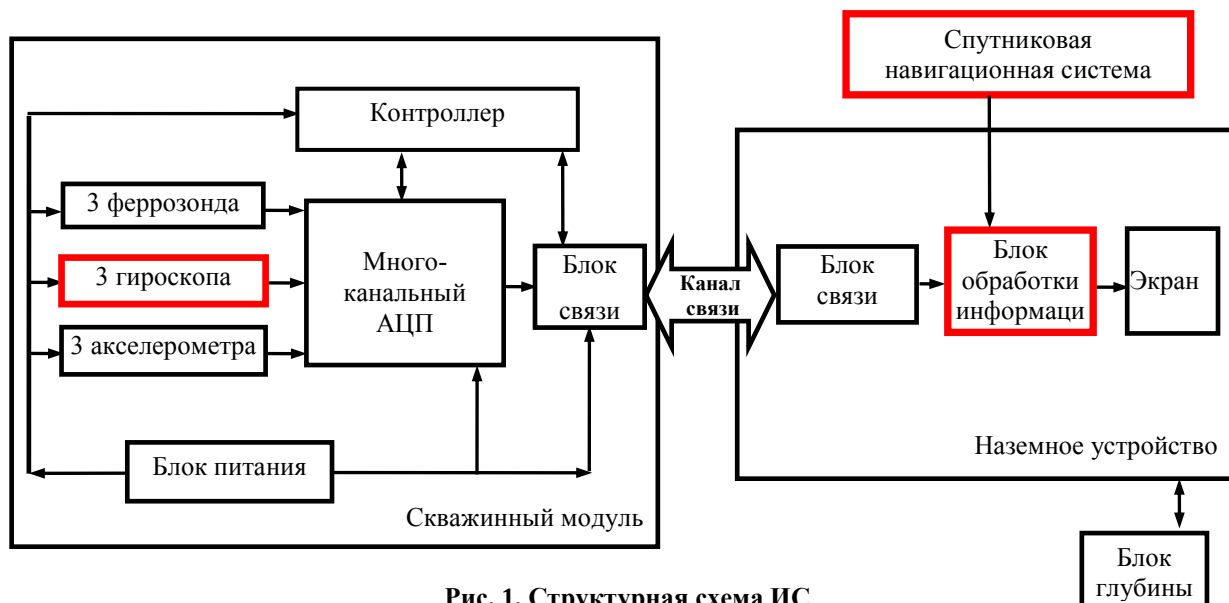


Рис. 1. Структурная схема ИС

тестирования ИС была выявлена необходимость введения дополнительных условий, позволяющих судить о достоверности измерений на базе гироскопических и магнитометрических датчиков. В качестве таких условий предложено использовать отклонения экспериментальных показаний гироскопов ΔD и феррозондов ΔT от опорных значений, абсолютную погрешность широты $\Delta\varphi_{ш}$ и условие пересечения интервалов:

$$\alpha \in \left\{ (\alpha_{\omega} - 2; \alpha_{\omega} + 2), (\alpha_h - 2; \alpha_h + 2) \right\} [8].$$

Алгоритм принятия решения о достоверности измерений, реализуется следующим образом.

В наземный блок поступают сигналы, измеренные скважным модулем (D_i, T_i, A_i). Далее происходит расчет пространственных углов $\alpha_{\omega}, \alpha_h, \varphi, \theta$, а также широты месторождения и угла магнитного наклона. На следующем шаге рассчитываются величины отклонения ΔD и ΔT , абсолютные погрешности $\Delta\varphi_{ш}$ и Δv .

Следующий этап – реализация процедуры выбора достоверного значения α из полученных α_{ω} и α_h . Результатом принятия решения являются следующие

сигналам с феррозондов и акселерометров ($\alpha = \alpha_h$);

- значению α присваивается значение азимута, полученное в результате вычислений по сигналам с гироскопов и акселерометров ($\alpha = \alpha_{\omega}$);
- значению α присваивается среднее значение азимута, полученное в результате вычислений по сигналам с феррозондов, гироскопов и акселерометров ($\alpha = \frac{\alpha_h + \alpha_{\omega}}{2}$);
- значению α присваиваются оба значения азимута: $\alpha_1 = \alpha_{\omega}$; $\alpha_2 = \alpha_h$.

Тестирование предложенного алгоритма проводилось во всем диапазоне пространственных углов скважины при различных значениях геомагнитных вариаций. При выполнении виртуального эксперимента было принято, что скважина проходит через участок протяженностью l , где магнитные аномалии создают одинаковое (однородное) отклонение магнитного поля Земли от нормы на ε_h % в каждой точке участка.

На рис. 2 представлен один из результатов

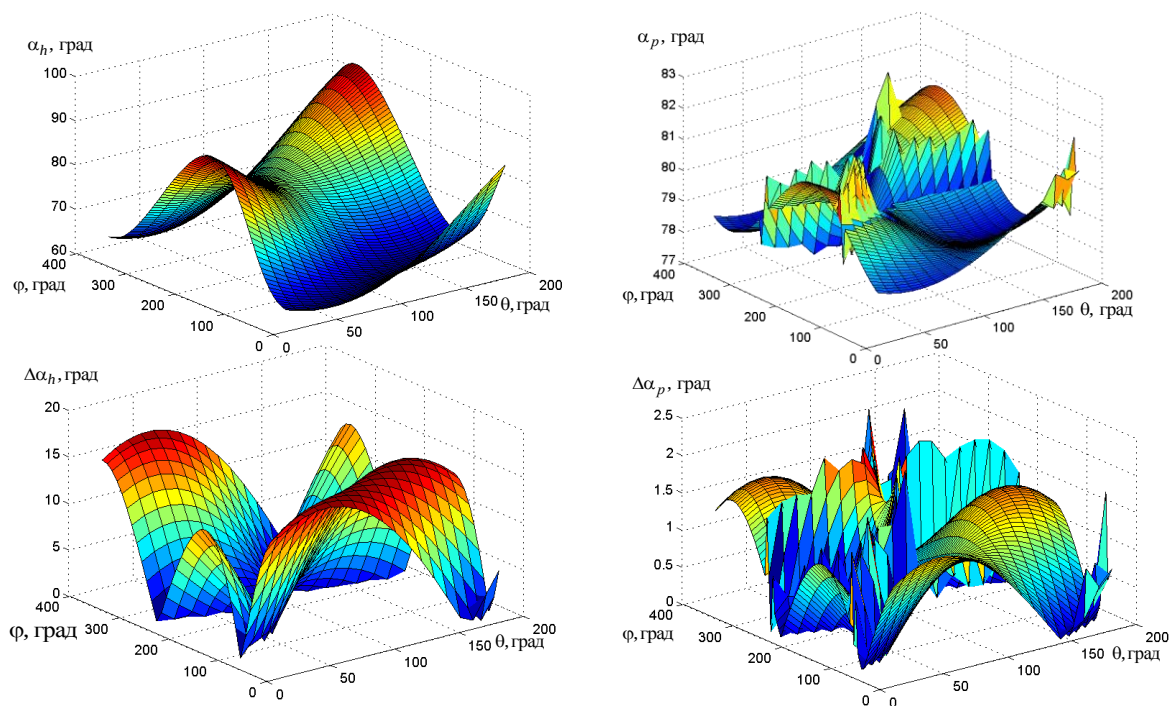


Рис. 2. Распределение рассчитанного значения азимута α_h , α_p и его абсолютной погрешности $\Delta\alpha_h$, $\Delta\alpha_p$ при различных значениях φ и θ .

варианты:

- значению α присваивается значение азимута, полученное в результате вычислений по

тестирования разработанного алгоритма – показаны характеры распределения рассчитанных значений азимутов α_h , α_p и их абсолютных погрешностей

$\Delta\alpha_h$, $\Delta\alpha_p$ при различных значениях φ и θ , $\varepsilon_h = 3\%$, $\alpha_o = 80^\circ$, $\varphi_{и} = 67,45^\circ$.

Здесь α_o – истинное значение азимутального угла, α_h – азимут, рассчитанный по сигналам с феррозондов и акселерометров, α_p – значение которое присваивается азимутальному углу в результате выполнения алгоритма принятия решения, $\Delta\alpha_h$ – абсолютная погрешность азимута, полученная в результате расчетов по сигналам с феррозондов и акселерометров, а $\Delta\alpha_p$ – значение, полученное в результате выполнения алгоритма принятия решения.

Представленный пример подтверждает корректность предложенного алгоритма, как видно из рис. 2 абсолютная погрешность азимута не превышает значение 2° при условии наличия магнитных аномалий. В свою очередь, предложенная модель ИС и синтезированный алгоритм принятия решения позволяют уменьшить абсолютную погрешность измерения азимута в условиях магнитных аномалий, вызванных наличием тел с повышенной магнитной восприимчивостью в окоскважном пространстве.

По итогам обработки результатов серии экспериментов, проведенных для каждого значения угла $\alpha \in [0; 360]$, при различных значениях $\varepsilon_h = [0,7; 1,5; 3]$, во всем диапазоне φ, θ , была рассчитана кратность уменьшения абсолютной погрешности азимута.

Результаты моделирования на рис. 3 демонстрируют, что применение дополнительного гироскопического блока позволяет уменьшить абсолютную погрешность азимута в среднем в 1,5 раза при $\varepsilon_h = 0,7\%$, в 2,5 раза при $\varepsilon_h = 1,5\%$, в 6,5 раз при $\varepsilon_h = 3\%$, где $\Delta\alpha_{h_{\max}}$, $\Delta\alpha_{p_{\max}}$ – максимальные значения абсолютных погрешностей.

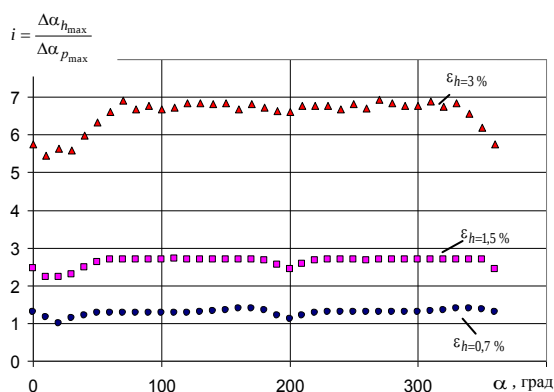


Рис. 3. Отношение абсолютных погрешностей азимута до и после реализации алгоритма принятия решения в зависимости от α

Аналогичные эксперименты, проведенные для других значений широты, позволили получить следующие

результаты: на средних широтах ($56,05^\circ$; $60,95^\circ$; $63,2^\circ$) точность восстановления азимута увеличилась от 1 до 5,19 раза при $\varepsilon_h \in [0,7; 3]$, на высоких широтах ($67,45^\circ$; 70°) точность восстановления азимута увеличилась от 1,27 до 7,68 раза.

4. Заключение

Объединение гироскопических и магнитометрических датчиков в одном скважинном модуле позволяет расширить функциональные возможности ИС, а именно:

- осуществлять контроль критического приближения к другой обсаженной скважине;
- контролировать целостность стенок обсадных труб при восстановлении старых месторождений;
- наводить буровой снаряд на ствол аварийной скважины при ликвидации аварии;
- решать ряд геофизических задач (поиск тел с повышенной магнитной восприимчивостью и последующее определение положения магнитных масс, расшифровка происхождения геомагнитных аномалий).

В свою очередь представленный способ определения пространственных углов искривления скважины на базе инклинометра со структурной избыточностью скважинного модуля позволяют повысить надежность, проводить измерения в обсаженных и открытых скважинах, использовать инклинометрическую систему при строительстве различных подземных объектов и поиске рудных полезных ископаемых.

Разработанный алгоритм принятия решения для ИС со структурной избыточностью позволяет делать вывод о достоверности измерений на базе магнитометрического или гироскопического модулей по итогам оценки допустимой флуктуации угла магнитного наклона, отклонения экспериментальных показаний гироскопов и феррозондов от опорных значений, абсолютной погрешности широты и условия пересечения интервалов измеренных азимутальных углов.

Список используемых источников

1. Исаченко В. Х. Инклинометрия скважин. – М.: Недра, 1987. – 216 с.
2. Иванова Г. А. Информационно-измерительная система на базе инклинометра со структурной избыточностью: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.16: защищена 26.12.2013 / Иванова Галина Алексеевна. – Уфа, 2013. – 182 с.
3. Пат. 2166084 РФ, МПК 7E21B47/022. Устройство для определения углов искривления скважины/ Г. Н. Ковшов Г.Н. [и др.]; заявитель УГНТУ; заявл. 14.07.2000; опубл. 27.04.01.

4. Барышников К. О. [и др.] Гибридный
5. докладов XV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». – СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2013. URL: <http://forum.acanud.ru/topic.html?id=709> (дата обращения 10.04.2014).
6. Иванова Г. А. Интегрированная измерительная инклинометрическая система // Вестник УГАТУ. – 2013. – Т. 17, №1 (54). – С. 158 –163.
7. Пат. 2503810 РФ, МПК E21B47/022. Способ определения углов искривления скважины / А. И. Заико, Г. А. Иванова; заявитель ФГБОУ ВПО
- гиромagnetометрический инклинометр // Рефераты УГАТУ. – № 2012128000/03; заявл. 03.07.2012; опубл. 10.01.2014.
8. Заико А. И., Иванова Г. А. Измерительная инклинометрическая система для подземной навигации // Датчики и системы: методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: труды научно-практической конференции. – Пенза: ПГУ, 2012. – С. 195 – 199.
9. Заико А. И., Иванова Г. А. Инклинометрическая система для подземной пространственной ориентации// Измерительная техника. –2014. – №7. – С. 52 –56.